深層混合処理とジオテキスタイル併用工法による 軟弱地盤上盛土の現地動的繰返し载荷試験結果の検証解析

(財) 鉄道総合技術研究所 小島謙一・館山 勝 台湾成功大学 黄 景川
日本鉄道建設公団 青木一二三・米澤豊司・村上 明

腐植土層が堆積する軟弱地盤上に鉄道盛土を構築するにあたって、鉄道開業後の沈下を極力抑制するために深層混合処理工法とジオテキスタイルとを併用して盛土を施工している。本工法においては、列車荷重を含めた上载荷重载荷時における攪拌混合杭の間隔とジオテキスタイルに生じるひずみ等の関係、未改良部との不同沈下の抑制効果など、静的および動的荷重状態での盛土や地盤の挙動を把握する必要が生じた。これらを検討するために現場において各種計測計器を設置し、列車走行を模擬した軌道繰返し衝撃試験機による動的载荷試験を実施した。加えて長期計測や解析等を行い合理的な設計方法を提案することとした。

本論文は、現地動的繰返し载荷試験結果をもとに有限差分法を用いて解析を行い、盛土や地盤の挙動、攪拌混合杭とジオテキスタイルの効果を評価するものである。

A numerical analysis of dynamic loading tests of the method to lay geosynthetic sheets on the soil cement columns for soft ground

K. Kojima and M. Tateyama : Railway Technical Research Institute
C.C.Huang : National Cheng Kung University

H. Aoki, T. Yonezawa and A. Murakami : Japan Railway Construction Public Corporation

Tohoku shinkansen is now being constructed on a very soft ground in the Hachinohe area. In this site, large settlement is predicted to occur on embankments under construction. We applied the geosynthetic sheet and soil cement column method to this site to decrease settlement of the ground. We tried two approaches to use this method; One is a dynamic loading test on the site, and the other is a numerical analysis of this site test.

This paper shows the numerical analysis of the dynamic loading test. We describe the normal stress and displacement of the ground, and tensions of geosynthetic sheets after dynamic loading.

深層混合処理とジオテキスタイル併用工法による 軟弱地盤上盛土の現地動的繰返し载荷試験結果の検証解析

(財) 鉄道総合技術研究所 小島謙一・館山 勝 台湾成功大学 黄 景川
日本鉄道建設公団 青木一二三・米澤豊司・村上 明

1.はじめに

腐植土層が堆積する軟弱地盤上に鉄道盛土を構築するにあたって、鉄道開業後の沈下を極力抑制するために深層混合処理工法とジオテキスタイルとを併用して盛土を施工している。本工法においては、攪拌混合杭の間隔とジオテキスタイルに生じるひずみ等の関係、未改良部との不同沈下の抑制効果など攪拌混合杭とジオテキスタイルの配置と効果について静的および動的荷重状態での盛土や地盤の挙動を把握する必要がある。これらを検討するために現場において各種計測計器を設置し、列車走行を模擬した軌道繰返し衝撃試験機による動的载荷試験を実施し¹⁾、载荷試験結果をもとに有限差分法を用いて検証解析を行い、盛土や地盤の挙動、攪拌混合杭やジオテキスタイルの効果を評価するものである。

2.現場概要

当現場は、東北新幹線盛岡－八戸間における八戸電留線盛土である。盛土材料は現場周辺で得られた山砂を用い、盛土高さは1.0m～4.0m程度である。図-1に現場地盤の柱状図を示す。地表面から深さ約4mの位置に

非常に軟弱な腐植土層があり、盛土施工に伴い大きな沈下が想定された。したがって、盛土施工後の残留沈下を極力抑制するために深層混合処理工法を用いて腐植土層を改良し沈下を軽減することとした。また、施工性・経済性を考慮して深層混合処理工法に2軸の施工機を採用したため、線路直角方

図-1 地盤柱状図

図-2 当現場における工法概要

向の改良杭の純間隔が1.5mとなり、部分的に盛土高さよりも大きくなる箇所が生じた。そのため、低盛土部においては、改良部と未改良部にかかる応力差が大きくなり、パンチング破壊が起こることが懸念された。よって、盛土内のパンチングによる変形を防ぐ工法として、ジオテキスタイルを敷設し盛土荷重を分散させる工法を採用した。図-2に盛土概要図を示す。本現場では、パンチング防止のジオテキスタイル材料として引張強度が60kN/mの材料を地盤面から0.3mと0.6mの高さに2層にわたり配置した。図-3に現場における動的載荷試験の概要図を示す。なお、動的載荷実験の詳細については文献(1)に詳しい。

3.動的載荷実験のシミュレーション

3.1数値解析概要

数値解析は、2次元有限差分法を用いて行った。図-3に本解析で用いたモデル図を示す。モデルは線路直角方向をモデル化した断面であり、計算の効率化を図るため半断面とした。計算誤差を少なくするために地盤、盛土および攪拌混合杭は四角形でモデル化を行った。路盤及び盛土は現場の試験の状況に合わせ半無限地盤とした。ジオテキスタイルには線形のケーブル要素を用いた。ジオテキスタイルと地盤の境界部にはインターフェースを用い、ジオテキスタイルが地盤内をすり抜けないという仮定の下で、圧縮、せん断バネともに $1 \times 10^7 \text{ kPa/m}$ を用いた。表-1に各種材料の入力パラメータを示す。地盤や盛土、攪拌混合杭はMohr-Coulombの破壊規準に準じた弾完全塑性体とした。ジオテキスタイルについては断面積 $=1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{m}$ 、変形係数 $=1.0 \times 10^7 \text{ kPa}$ 、引張降伏応力 $=60 \text{ kN/m}$ とした。

図-3 解析モデル図

表-1 入力パラメータ

材料	密度 (t/m^3)	ポアソン比	せん断剛性 $G_{\max}$ (kPa)	変形係数 $E_{\max}$ (kPa)	粘着力 c (kPa)	内部摩擦角 ϕ (度)
粒調碎石 (路盤)	2.0	0.25	1.20×10^5	3.00×10^5	0	45
砂 (盛土)	1.8	0.3	5.42×10^4	1.41×10^5	0	40
腐植土 0.8～3.8m (地盤)	1.1	0.4	5.78×10^3	8.25×10^3	10	5
軽石 3.8～6.2m (地盤)	1.5	0.3	9.60×10^4	2.50×10^5	0	20
シルト質粘性土 6.2～9.0m (地盤)	1.5	0.4	1.19×10^4	1.71×10^4	10	15
コンクリート (載荷板)	2.4	0.2	9.79×10^6	2.35×10^7	—	—
ソイルセメント (攪拌混合杭)	1.5	0.25	2.15×10^6	5.38×10^6	200	45

境界条件は底面では水平方向のみ固定、底面では鉛直方向のみ固定とした。動的解析時には底面及び端部側面において水平・鉛直とも粘性境界とした。

数値解析はジオテキスタイルと攪拌混合杭の効果に着目して以下に示す検討項目に従い、ケーススタディを実施した。

- ①盛土高さの違いにおける本工法の効果。
- ②パンチング破壊防止のために敷設したジオテキスタイルの補強効果。
- ③動的載荷荷重の違いによる地盤の挙動。

表-2に今回の解析ケースを示す。盛土高さ、ジオテキスタイルの有無、動的荷重をパラメータとした9ケースの計算を行った。解析は静的解析により自重解析を行い地盤の初期応力状態を決定した。その後、静的解析により盛土構築による地盤の変形・応力を求めた後、列車荷重に相当する動的荷重を載荷した。動的荷重は、現場試験と同じ条件である正弦波、22Hzとし、現場で用いた載荷板と同一の載荷面積で載荷した。本検討は変形等が大きいと考えられる施工初期の列車荷重載荷時を想定し、加振初期の挙動に着目した。

表-2 解析ケース

ケース名	盛土高	改良杭の純間隔	ジオテキスタイル	動的荷重
ケース1 (a)	2.5m	1.5m	2層(60kN/m)	±60kN
ケース1 (b)	2.0m	1.5m	2層(60kN/m)	±60kN
ケース1 (c)	3.75m	1.5m	2層(60kN/m)	±60kN
ケース2 (a)	2.5m	1.5m	なし	±60kN
ケース2 (b)	2.0m	1.5m	なし	±60kN
ケース2 (c)	3.75m	1.5m	なし	±60kN
ケース3 (a)	2.5m	1.5m	2層(60kN/m)	±120kN
ケース3 (b)	2.5m	1.5m	2層(60kN/m)	±180kN
ケース3 (c)	2.5m	1.5m	2層(60kN/m)	±240kN

3.2解析結果

(1)盛土施工に伴う応力について

図-4、5に盛土施工後のジオテキスタイルを2層敷設した場合（ケース1 (a)～(c)）の地盤面での鉛直応力分布（圧縮が正）、ジオテキスタイルの張力（引張りが正）を示す。図中に示す距離は、モデル左端からの距離である。攪拌混合杭の施工位置は1.25、3.75、6.25mである。図-4に地盤面での鉛直応力分布を示す。杭頭部において応力が集中し、杭の施工されていない中間部の応力と比べ約4～6倍の大きさとなった。また、盛土高さによる違いを見ると、盛土高さの増加率とほぼ同程度の割合で杭頭部における応力の増加が生じた。これに従うと、杭頭部で盛土高さ2.5mの場合は約90kPa、盛土高さ3.75mでは120kPaとなる、実際の現場における盛土高さ3.0mの場合を推定すると100～110kpa程度となる。参考文献1によると現場での測定結果が70kPaとなった。実測値と比較すると、若干大きめの値となっているがほ

ば解析値は実際の現場での値を模擬しており、モデルの妥当性が確認された。よって、以降のパラメータケーススタディはこのモデルを用いた。ここで生じた実測と解析の鉛直応力の差は、一軸圧縮強度から推定した改良体の物性値が要因の1つであると考えられる。図-5に示すジオテキスタイルの張力においては、杭頭部の方が杭中間部よりも上層のジオテキスタイルで3～4倍程度、下層で1.5～2倍程度大きい値となった。また、0.3m上層の方が下層と比べて、杭頭部で2倍程度、大きな張力が発生していた。盛土高さでは、鉛直応力同様、高さに応じて差が生じ、盛土高さが約1.8倍となると鉛直応力は約1.3倍の増加となった。

図-4 地盤面での鉛直応力分布

図-5 ジオテキスタイルの張力分布

(2) 盛土高さの影響について

ケース1 (a)～(c)の比較から盛土高さの違いによる地表面での鉛直応力、鉛直変位、ジオテキスタイルの張力について比較検討を行った。検討は、杭中間部（計測点A）と杭頭部（計測点B）の2点を抽出し、盛土施工終了後を初期状態として動的載荷に伴う増分で検討を実施した。図-6に杭中間部、図-7に杭頭部の動的載荷に伴う鉛直応力を示す。杭中間部では、盛土高さが2.0mと2.5mでは有意な差はないが、3.75mになると鉛直応力は小さくなっており、盛土高さが約1.8倍になるにしたがい鉛直応力は約0.7倍となった。杭頭部では杭中間部ほど盛土高さによる差はないが、若干、盛土高さの高い方が小さな応力となった。また、杭中間部と比較して、杭頭部では約5倍の応力が発生し、杭の部分への応力集中が伺える。また繰返し回数が増えるとともに、1～3kPaとわずかではあるが鉛直応力は増加傾向にある。図-8、9に鉛直変位分布を示す。図-8に示す杭中間部では載荷に伴う累積変位が顕著に現れている。また、盛土高さが高い3.75mの場合は他のケースと比較して沈下量やその増加率が小さく、盛土高さが2.0、2.5mの場合の約1/2である。杭頭部での鉛直変位を図-9に示すが、盛土高さによる差は杭中間部ほど大きくない。変位量についても、杭中間部と比較すると1/2～1/4程度と小さかった。しかし、盛土高さが低い2.0mの場合は変位の増加率が非常に大きくなった。図-10には杭中間部のジオテキスタイルの張力を示す。載荷に伴い、張力が増加していくことが解る。鉛直変位同様、盛土高さが高い方が張力やその増加率も小さく、その差は鉛直変位における比率とほぼ一致している。図-11は杭頭部のジオテキスタイルの張力であるが、杭中間部と

比較して小さい。 載荷に伴い張力は増加するが、その増加率についても杭中間部と比べると小さいことが解る。 盛土高さによる差は、あまり大きくなり0.001kN程度であった。

図-6 動的載荷時の地盤面の鉛直応力（杭中間部）

図-7 動的載荷時の地盤面の鉛直応力（杭頭部）

図-8 動的載荷時の地盤面の鉛直変位（杭中間部）

図-9 動的載荷時の地盤面の鉛直変位（杭頭部）

図-10 動的載荷時のジオテキスタイルの張力
(杭中間部)

図-11 動的載荷時のジオテキスタイルの張力
(杭頭部)

(3) ジオテキスタイルの効果について

ケース 1 (a) とケース 2 (a) を比較することにより、ジオテキスタイル敷設による補強効果を比較した。図-12に地盤面での鉛直応力を示す。図中太線が杭頭部、細線は杭中間部である。ジオテキスタイルの有無によって大きな差は生じてない。図-13に鉛直変位を示す。杭中間部において10%程度ジオテキスタイルのない場合の方が大きな変位となり、ジオテキスタイル敷設による効果が現れている。杭頭部については、ほとんど違いが生じなかった。

(4) 動的荷重の違いについて

ケース 1 (a)、ケース 3 (a) ～ (c) の比較から、動的載荷重の違いによる挙動の違いを比較した。図-14に杭中間部での鉛直応力を示す。ケース 1 (a) の4倍の載荷を行うと、10倍近い鉛直応力の増加が生じた。杭頭部での値を図-15に示すが、杭頭部ではあまり大きな増加は見られず、4倍の載荷荷重に対して2.5倍程度の増加となった。図-16は杭中間部の鉛直変位である。鉛直応力の増加とほぼ同様に、載荷荷重が4倍となると10倍程度の変位の増加が生じた。変位の増加率は載荷荷重の大きい方が大きく、載荷荷重が4倍となると約10倍の差がある。杭頭部の鉛直変位を図-17に示すが、4倍の載荷荷重の増加に対し、約5倍の鉛直変位の増加である。載荷荷重の増加と鉛直変位の増加の比は、杭中間部で約2.5、杭頭部で約1.25と荷重レベルによらずほぼ一定であることがわかる。ジオテキスタイルの張力を図-18、図-19に示す。

杭中間部である図-18を見ると、鉛直応力、鉛直変位同様、4倍の載荷荷重に対し5～6倍程度の張力の増加が見られる。図-19に示す杭頭部では、4倍の載荷荷重の増加に対し、4～5倍となった。

図-12 動的載荷時の鉛直応力

図-13 動的載荷時の鉛直変位

図-14 動的載荷時の鉛直応力（杭中間部）

図-15 動的載荷時の鉛直応力（杭頭部）

図-16 動的載荷時の鉛直変位（杭中央部）

図-17 動的載荷時の鉛直変位（杭頭部）

図-18 動的載荷時のジオテキスタイルの張力
（杭中央部）

図-19 動的載荷時のジオテキスタイルの張力
（杭頭部）

4. 結論

盛土高さ、ジオテキスタイルの有無、動的載荷荷重をパラメータとして、攪拌混合杭とジオテキスタイルによる軟弱地盤上盛土の変形抑止対策工法の効果について、有限差分法による数値解析を用いて検討し、以下の結果を得た。

①盛土高さを高くすることにより、地盤面における動的荷重は減少し、鉛直応力は、盛土高さが約1.8倍になると0.7倍程度となった。鉛直変位においては、杭中間部と杭頭部において挙動が大きく異なり、杭中間部では変位の累積が顕著であったが、杭頭部ではあまり変位の累積は生じなかった。杭中間部では盛土高さの低いものの変位は特に大きく、変位の増加率についても杭中間部では約0.6倍程度の盛土高さに対して約2倍となり、非常に大きくなることがわかった。逆に、杭頭部では杭の強度が高いため、あまり盛土高さによる違いはなかった。

②ジオテキスタイルの有無により、ジオテキスタイルの効果を比較検討した。しかし、杭中間部の鉛直変位において、若干、ジオテキスタイルを敷設した方が小さな値となったが、今回検討を行った荷重レベルでは顕著な差は見られなかった。

③動的荷重を2, 3, 4倍と増加させたときの、地盤の挙動について比較を行った。杭中間部では鉛直応力、鉛直変位、ジオテキスタイルの張力のいずれにおいても、載荷荷重を増加させるとほぼ同程度の割合（約1.5倍）で増加率が増加した。杭頭部においても、杭中間部ほど顕著ではないがいずれの値も若干の増加が生じた。以上の結果より、杭中間部においてジオテキスタイルが受け持つ応力が大きいことが解る。載荷荷重の増加率と同程度の増加が見られた。これより、杭中間部においてはジオテキスタイル受け持つ応力が非常に大きいことが確認でき、本工法が有効に機能していることがわかる。

今回の解析から動的荷重載荷時において、杭中間部と杭頭部では鉛直応力や鉛直変位が大きく異なった。実測値の傾向同様、杭頭部では鉛直応力が高く、鉛直変位が小さくなった。特に変位については、大きく挙動の傾向が異なり杭中間部での変位の累積速度が盛土高さや動的荷重によって異なり、それと同時にジオテキスタイルの張力が同様な挙動を示した。今回検討した各パラメータについては、盛土高さが増加すると荷重分散効果により地盤に伝わる鉛直応力や鉛直変位、ジオテキスタイルの張力が減少することが確認された。また、動的荷重に関しては盛土高さ以上に差が大きいことが解った。

本検討では各パラメータにおけるケーススタディとして、比較的変形などの変化が大きい動的載荷初期に着目し、検討を行った。載荷初期においても、図-6,7に示すように鉛直土圧についてはほぼ定常となったが、沈下やジオテキスタイルの張力については累積傾向にあり、長期的な繰返し載荷における検討が必要であると考えられる。今後は現場での試験結果を踏まえ、本工法の効果・特徴を評価し合理的な設計法へ反映する予定である。

参考文献

(1)村上明, 青木一二三, 米澤豊司, 矢崎澄雄, 舘山勝, 小島謙一: 深層混合処理とジオテキスタイル併用工法による軟弱地盤上盛土の現地動的繰返し載荷試験, 第14回ジオシンセティックシンポジウム, 2000.12.